

Az „*Elektromágneses hullámok mesterséges periodikus szerkezetekben*” című OTKA pályázat keretében 3 éves futamidőben (2004-2006) 8622 eFt támogatási összeggel fotonikus kristályok előállítását, kísérleti és elméleti vizsgálatát tűzhattük ki kutatási célként.

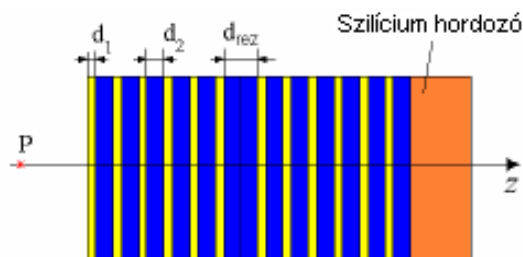
Bebizonyítható, hogy a kristályos anyagok szerkezetéhez hasonló, de mesterségesen előállított és a mikrométer tartományba eső ismétlődési távolságú periodikus szerkezetekben – fotonikus kristályokban - a fényhullámok terjedése közben ugyanolyan szimmetria-törvények érvényesülnek, mint amelyek az ismert kristályos anyagokban az elektronok mozgása során meghatározzák az anyagok vezetési tulajdonságait. Nevezetesen a fényhullámok energia-diszperziós függvénye energiasávokba rendeződik, amelyekben léteznek tiltott frekvenciájú sávok. A tiltott frekvenciájú fényhullámok nem terjedhetnek, nem lehetnek jelen a fotonikus kristály belsejében. A szabályos periodikus szerkezetbe beépített hibahelyek, vonalhibák, elágazások, eltérítő sarokelemek mentén azonban a fényt szinte bármilyen előre elkészített pálya mentén el lehet vezetni. Az elektromágneses hullámok terjedését számítógépes szimulációval modellezzük egy- és kétdimenziós szabályos és rácshibás szerkezetű anyagokban.

Kezdetben tanulmányoznunk kellett a mesterséges periodikus szerkezetekben terjedő elektromágneses hullámokról megjelenő, egyre növekedő számú irodalmi közleményeket. A látható fény hullámhossz-tartományában a mesterséges fotonikus kristályok tulajdonságai lehetőséget nyitnak az információterjedés és -processzálas tisztán optikai jelekkel történő jövőbeli megvalósítására. Az ilyen anyagok és eszközök kísérleti előállítása és vizsgálata biztató kihívást jelent az Intézetben összegyűlt ismeretek, tapasztalatok, eszközök és módszerek újszerű alkalmazására. Ezen az ígéretes új területen célszerűnek láttuk az MTA MFA eszközeivel bekapcsolódni a világszerte kibontakozó kutatási tevékenységbe.

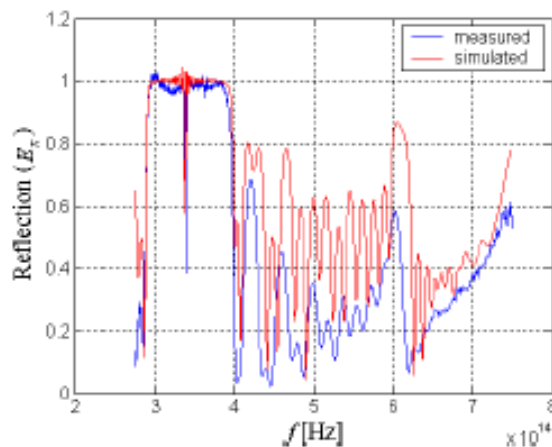
Az OTKA pályázat résztvevői konzultációk, az irodalmi ismeretek megosztása, kísérleti lehetőségek és tervek megbeszélése céljából viszonylag rendszeres időközönként megbeszélésekre gyűltek össze. A megszerzett alapvető ismereteket népszerűsítő előadásokkal és közleményekkel megosztottuk az érdeklődő tudományos közvéleménnyel pl. a BME és a Nagyvárad Egyetem szemináriumain valamint a magyar nyelvű Híradástechnika című folyóiratban.

Számítógépi modellezés FDTD módszerrel

Szabó Zsolt „Magyar Zoltán” posztdoktori ösztöndíjas kollégával együttműködve az „időtartománybeli véges differenciák FDTD” módszerén alapuló számítógépes modell

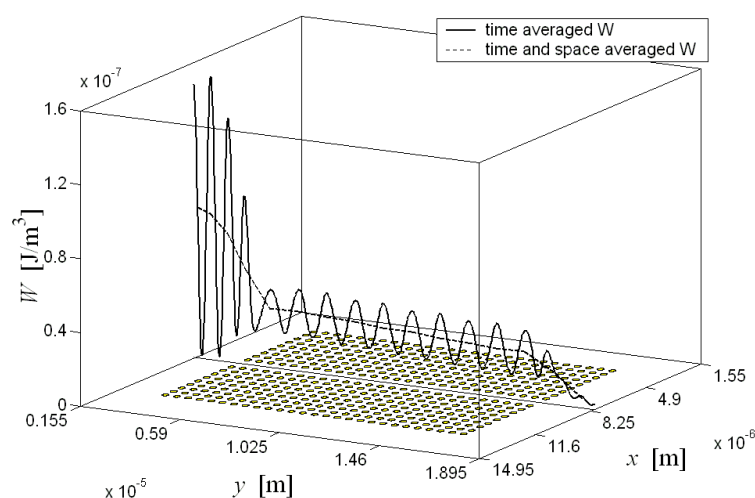


1. ábra. Egydimenziós fotonikus kristály Bragg tükör, amelyben egy réteghiba rezonáns frekvenciát keltett

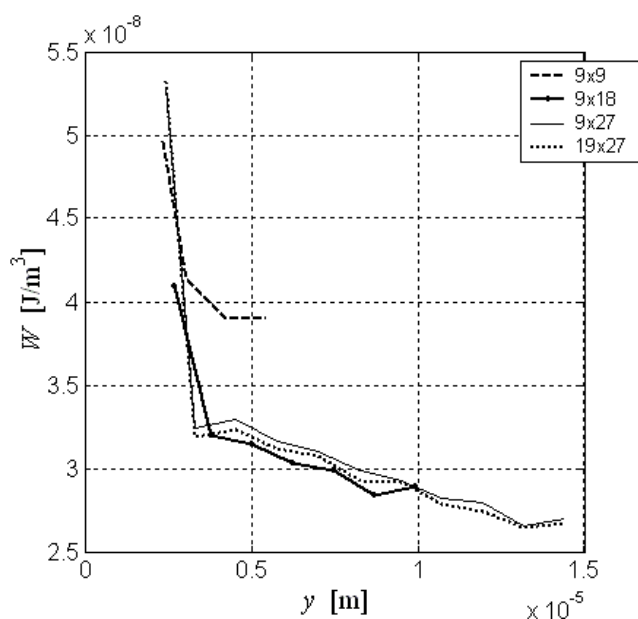


alkalmazásával vizsgáltuk egydimenziós fotonikus kristálynak tekinthető Bragg-tükrökben és egy „réteghibával” előállított Fabry-Perot rezonátorban a fényterjedés elméleti szimulációját. Az eredmények Volk János és Szipőcs Róbert kísérleti adataival összehasonlítva jó egyezést, tehát az elméleti módszer alkalmazhatóságát mutatják. Az eredményekről Grazban az IGTE 2004 konferencián számoltunk be, a COMPEL folyóirat 2005-ben közölte az idevonatkozó közleményt.

Kétdimenziós fotonikus kristály modellekben is végeztünk FDTD számításokat. Az egyszerűség kedvéért először olyan geometriai modellt választottunk, amelyben a nagy törésmutatójú anyag periodikusan elrendezett oszlopait veszi körül az egységnyi törésmutatójú vákuum vagy levegő. A tiltott energiasávba eső hullámok a periodikus tartományban nem terjedhetnek, de az így kialakított hullámvezető vonal mentén bizonyos veszteséggel terjedhetnek. A szilícium irodalomból ismert frekvenciától függő komplex törésmutató adatait (diszperziós függvényét) felhasználva bármilyen frekvencián ki tudjuk számítani az egységnyi terjedési távolságra eső energiaveszteséget.



Átlagolt energiasűrűség szilícium alapú fotonikus kristály hullámvezető vonal mentén



Idő szerint és terjedési távolság szerint is átlagolt energiasűrűség különböző hosszúságú fotonikus kristály modellek esetén. A becsült veszteség kb. 900 dB/cm

A szilícium alapú modellben kapott eredményeket egy koreai-magyar szemináriumon mutattuk be, a szervezők CD lemezen megjelentették, a közlemény a Current Applied Physics folyóiratban 2006-ban jelent meg.

A szakirodalomban találtunk kísérleti adatot, amelyet elméleti számításokkal kívántunk reprodukálni (A. Talneau, L. Le Gouezigou, N. Bouadma, *Quantitative measurement of low propagation losses at 1.55 μm on planar photonic crystal waveguides*, Optics Letters, 26 (2001) 1259). InP félvezető szeletben kétdimenziós fotonikus kristályt alakítottak ki hengeres üregek periodikus háromszög rácsú elrendezésével. Ebben a fotonikus kristályban hullámvezető hibavonalakat hoztak létre akképpen, hogy ezeknek a vonalaknak a mentén a szelet anyaga üregek nélkül érintetlenül megmaradt. A számított veszteség nyilvánvalóan függ az anyag frekvenciafüggő vezetőképességétől azaz képzetes permittivitásától. Az említett publikáció szerint 110 dB/cm veszteséget mértek az általunk reprodukálni szándékozott geometriai elrendezésben. Találtunk olyan másik publikációt, amelyben a mért veszteség 18 dB/cm volt (Kotlyar, M.V., Karle T., Settle M.D., O'Faolain L., Krauss T. F., *Low-loss photonic crystal defect waveguides in InP*, Applied Physics Letters, vol 84, No. 18, pp.3588-3590 (2004)). Természetesen a számításainkban használt geometria egyelőre kétdimenziós, vagyis az egyik dimenzió mentén végtelen méretű, ezért az adott veszteség értékhez modellünkéből kapható vezetőképesség és képzetes permittivitás csak a felső határt jelöli ki.

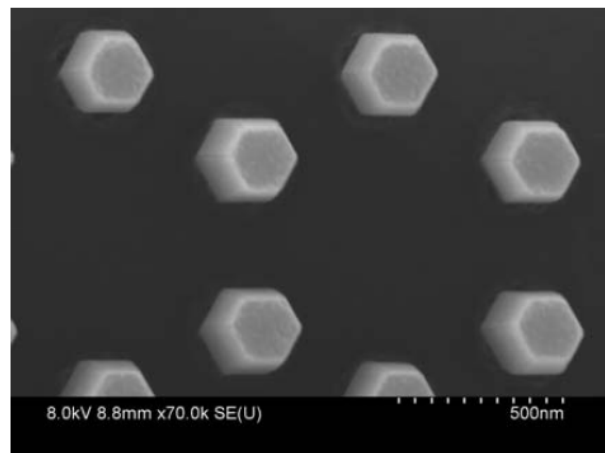
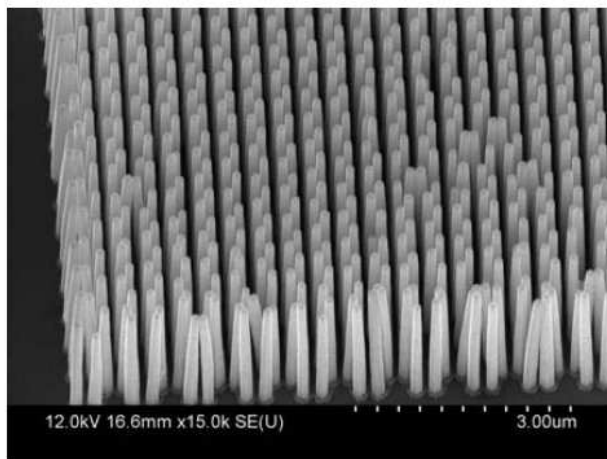
σ ((Ωm)- 1)	3.46	14.24	21.36	28.48
$\text{Im}(\varepsilon_r) \cdot 10^3$	0.302	1.24	1.86	2.48
Loss (dB/cm)	18	75	114	148

Az InP alapú fotonikus kristály hullámvezető veszteségi számításait, az eljárás leírását és eredményeit Vareseben, Olaszországban az OWTNM 2006 (XV International Workshop on Optical Waveguide Theory and Numerical Modeling) konferencián mutattuk be.

Az FDTD modellezéssel kapott eredményeinkkel általában részt vettünk az Európai Unió kutatási együttműködési programjának COST P11 (European Cooperation in the field of Scientific and Technical research) „Physics of linear, non-linear and active photonic crystals” című műhelytalálkozóin is bemutattuk: a TM és TE módusú hullámok terjedéséről vonatkozó előadásokat Franciaországban és Hollandiában, az alagút effektushoz hasonlítható szuperluminális fényterjedésről fotonikus kristályokban és a tiltott energiasáv fénnel indukált eltolódásáról Belgiumban (nem referált publikációk).

Szabó Zsolt megpályázta és két évre elnyerte a Japanese Society for the Promotion of Science (JSPS) japán állami tudománypolitikai társaság posztdoktori ösztöndíját. Így jelenleg Tsukubában a National Institute for Materials Science (NIMS) intézetben Kazuaki Sakoda professzor, a fotonikus kristály szakterület közismert szakembere vezetésével dolgozik. Szoftver csomagot készített, amellyel 3 dimenziós fotonikus kristályok FDTD modellezését és vizsgálatát kezdetjük el.

Volk János kollegánk ugyancsak a tsukubai NIMS intézetben dolgozik jelenleg és kísérleti munkájának feladata ZnO oszlopokból álló fotonikus kristályok előállítása és esetleges hasznosítása. Az elmúlt hónapokban elkészült mintáinak minősítésére hazai együttműködéssel is módunk nyílik. A hatszöges alakú ZnO oszlopok hatszöges rács szerinti elrendeződését jól illusztrálják a hazaküldött mintáján kapott pásztázó elektron mikroszkópos alábbi felvételek. A minták további tanulmányozása jelenleg is folyamatban van.



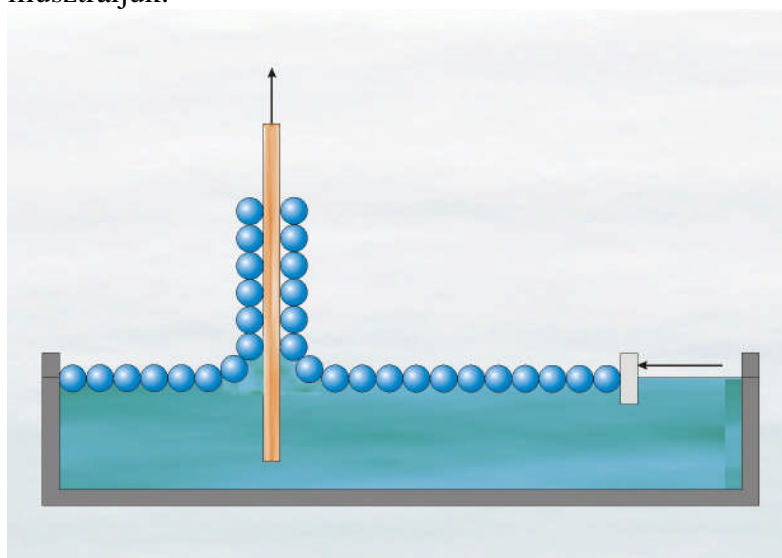
Önszervező maszkolás Langmuir-Blodgett filmekkel

Kétdimenziós fotonikus szerkezetek kialakításához, illetve – a legtöbb esetben – háromdimenziós fotonikus kristályok készítésének első lépéseként a fény hullámhosszával összemérhető periodicitású felületi mintázat létrehozása a feladat. Ez a hagyományos litográfiai módszerekkel nem megvalósítható. Az elektronsugaras litográfia és a fókuszált ionnyalábbal (FIB) történő marás nagy felületen történő alkalmazása rendkívül költség- és időigényes. Ezért a fotonikus szerkezetek kialakítása nagy felületen, illetve nagy térfogatban valójában nem megoldott feladat. Szóba jöhet még a holográfia felhasználása, melyre már történtek kísérletek, de igazi áttörést még nem hozott.

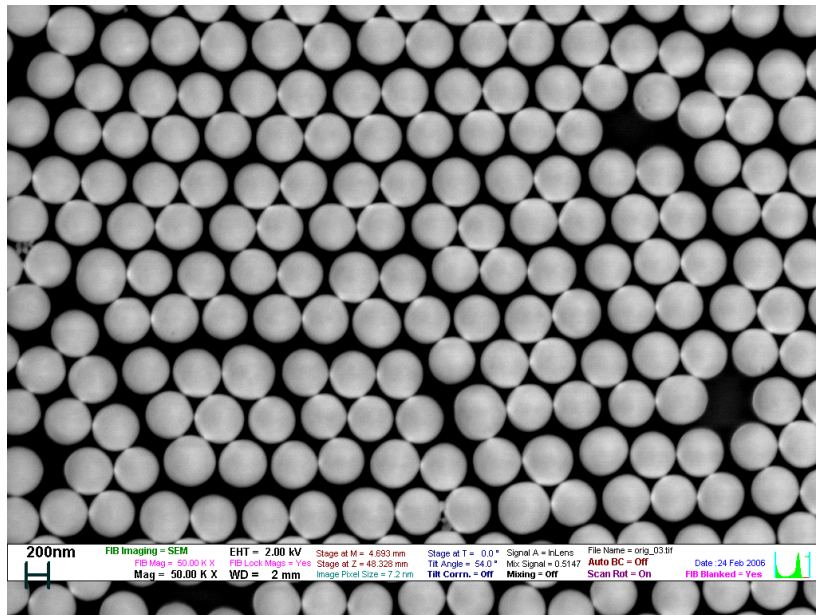
Együttműködésben a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Fizikai Kémia Tanszékének Kolloidika Csoportjával eljárást dolgoztunk ki – lényegében – tetszőlegesen nagy felületen szabályosan periodikus mintázatok kialakítására, széles tartományban szabadon választható periódushosszal.

A kolloidkémiai alapkutatásokban jól ismert, szol-gél eljárással előállított Stöber szilika részecskéket Langmuir-Blodgett technikával vittük fel a szilícium hordozóra. Ezek a SiO_2 részecskék gömb alakúak, méretük 20 nm-től akár több μm -ig változtatható.

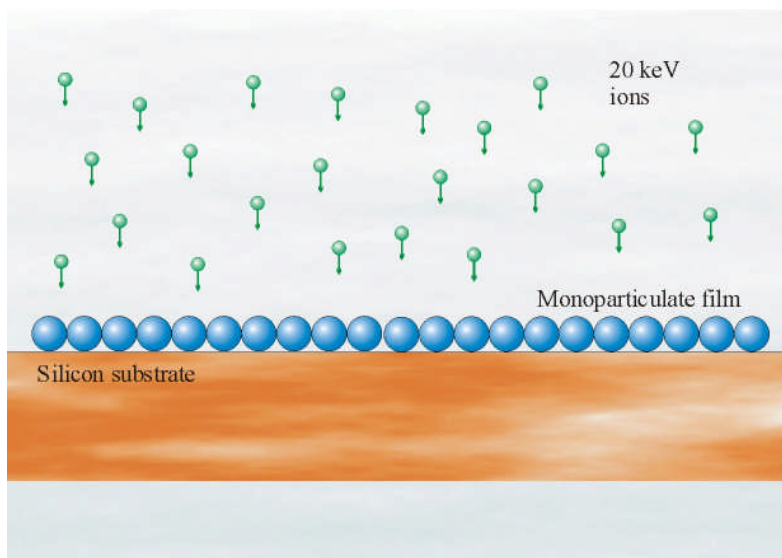
A kísérletsorozat lépéseit az alábbi rajzokkal és pásztázó elektron mikroszkóp felvétellel illusztráljuk:



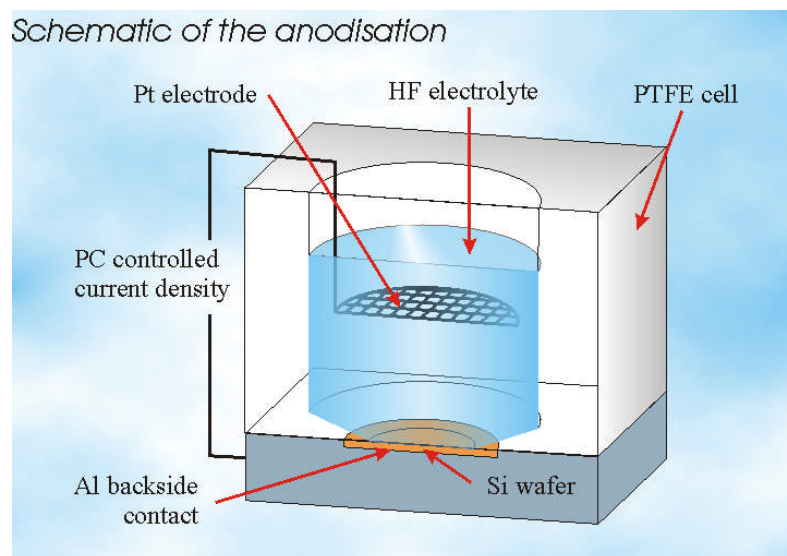
réteghúzás Si
hordozóra



egy gömbréteg
FESEM felvétele



ionimplantáció
golyómaszkon
keresztül

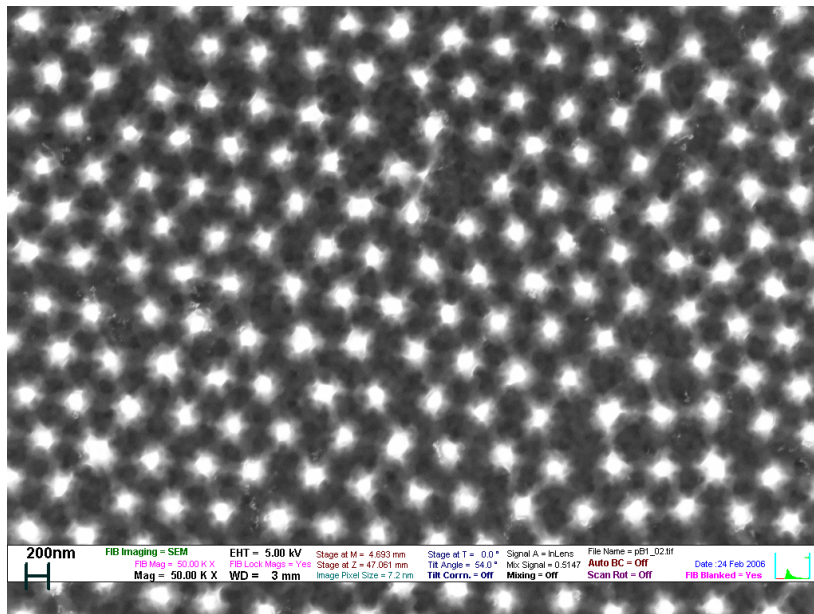


elektrokémiai marással
jön létre a pórusos
szilícium (lúgos
marással leoldható)

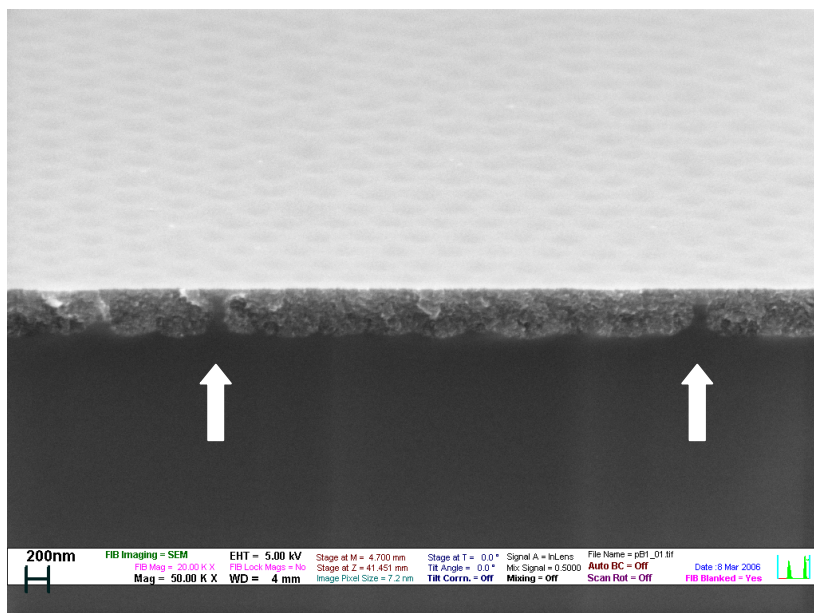
A Langmuir-Blodgett (LB) technika lehetővé teszi, hogy egy lépésben, akár szeletméretű felületre vigyünk fel egy sor részecske által alkotott réteget, melyben a nanogömbök szabályosan, szoros illeszkedésben helyezkednek el. Többretegű film készítéséhez a lépést egyszerűen meg kell ismételni. Ekkor, természetesen, a következő réteg is a szoros illeszkedésnek megfelelően helyezkedik el az alatta lévő rétegen.

Ilyen, 350 nm átmérőjű szilika gömbökből készült egy- illetve kétrétegű filmeket használtunk maszkként az ionimplantációhoz. E maszkon keresztül (100) orientációjú p- és n-típusú alapszeletbe implantáltunk bórt, illetve foszfort. Az implantáció energiáját Monte-Carlo szimulációk alapján úgy választottuk meg, hogy az ionok a nanogömbökben biztosan megálljanak. Az implantált dózis értékét az alapján jelöltük ki, hogy a golyók közt a hordozót elérő ionok térfogati koncentrációja megfelelő legyen a következő lépéshez, a szilícium pórússal marásához.

Az ily módon kialakított laterális periodikus adalékkoncentráció-mintázatot a szilícium elektrokémiai marásával alakíthatjuk a kívánt domborzati struktúrává, hiszen az anódizáció ott zajlik preferenciálisan, ahol a lyukak koncentrációja nagyobb. Végül a pórússal marás – igény szerint – lúgos marással leoldható.



B-ral implantált p-típusú szilícium szelet FESEM felvétele a pórússal eltávolítása után. A marás a nanorészecskék között történt, ahol a B-ionok elérték a hordozót. A gömbök alatt kristályos, ca. 300 nm magas szilícium oszlopok maradtak, ezek felülnézetből világos köröknek látszanak.



B-ral implantált p-típusú szilícium szelet keresztmetszeti FESEM felvétele a pórússal eltávolítása után. A keresztmetszet vonalában megmaradó, sötét kristályos szilícium oszlopokat a nyilak jelölik.

Bár az LB filmek sohasem hibamentesek és orientációjuk sem megoldható, egy 2004-es Nature cikk tanulsága szerint már létezik eljárás egy- és többrétegű, tökéletesen hibamentes és rendezett szilika rétegek készítésére. Így eredményeink jelentősége túlmutat az általunk kivitelezetteken, amik inkább az eljárás működésének demonstrálását szolgálták.

Ezen eredményeket márciusban mutattuk be a PSST 2006 konferencián. Munkánkat a zsűri a legjobb poszter díjával jutalmazta. Az eredményeket szóbeli előadásban is ismertettük a COST P11 találkozón. E két alkalom számos – eddig még kiaknázatlan – nemzetközi együttműködési lehetőséget is hozott. A kísérletsorozatból APL cikk született.

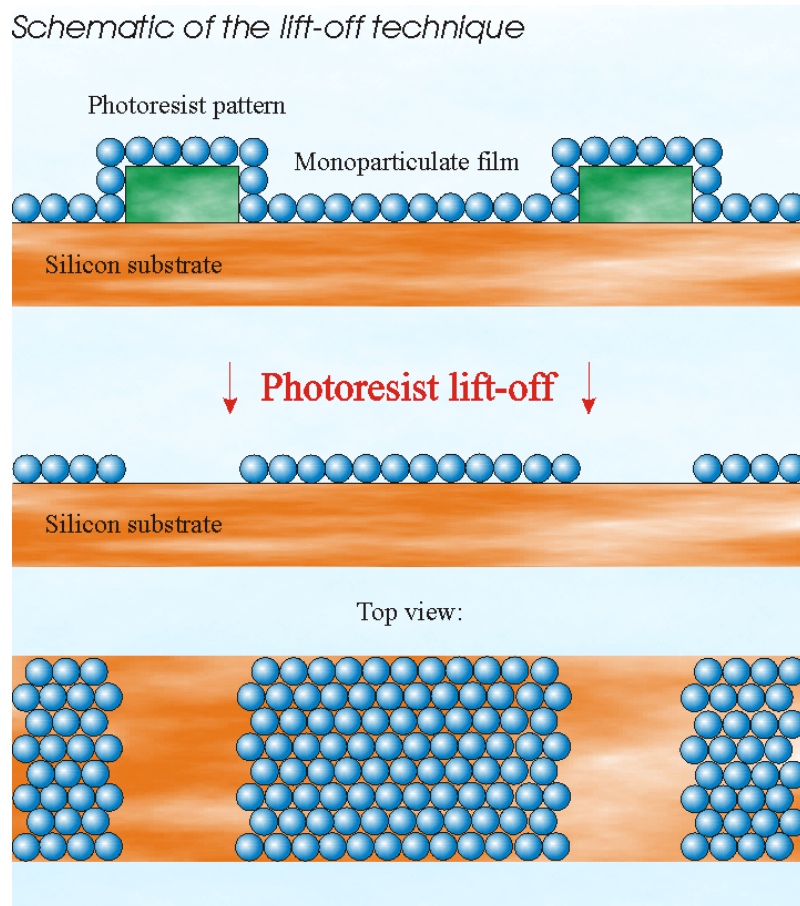
A Langmuir-Blodgett gömbrétegek minősítése

A LB rétegek gyors és költségghatékony minősítésének igénye indított e rendszerek ellipszométeres vizsgálatára. A mérés-kiértékelés eredményein annak a felismerésnek a jelentősége mutatott túl, mely szerint a gömb alakú részecskék közel szoros illeszkedésű rendszere kitűnő modellrendszer az effektív közeg közelítések (EMA) szempontjából. Kimértük az EMA érvényességi határait erre a rendszerre, és új megfontolást ajánlottunk ezek meghatározására. Megállapítottuk, hogy ezen optikai szerkezetek esetén – ellipszometria alkalmazásakor, a vizsgált mérettartományban – nincs szükség az optikai modellben “szeletekre” osztásra, a gömbi alak meghatározóbb, mint a porozitás – s így az effektív törésmutató – mélységi eloszlása. A mért, ideálistól eltérő porozitás-értékek alapján becslést adtam a részecskék átlagos távolságára – vagyis a lefedettségre – egyrétegű filmben. Felvetettük annak a lehetőségét, hogy több réteg esetén a mért effektív vastagság értékének ideálistól való eltérését a polidiszperzitás okozza. Ennek ellenőrzésére és pontosabb optikai modellek felállítására a rétegszerkezet (molekuladinamikai) szimulációja szükséges. Eredményeinket a nyár elején a Langmuir című újságban ismertettük.

A fenti két téma – szinte triviális – továbbvitele zajlott a nyár folyamán. A rendezett szerkezetek esetében fotonikus hullámvezető struktúrák újszerű kialakításának demonstrálása volt a cél. Fotoreziszt mintázat készült a Si hordozóra, majd erre húztuk a LB réteget. Innen két lehetőségünk is volt: használhattuk a rezisztet is maszkként az ionimplantációhoz, illetve acetonnal leoldhattuk, eltávolítva a rajta található golyókat is, így utcát nyitva a maszkoló rétegben. A további lépések a már ismert módon történtek.

Fotonikus hullámvezető szerkezetek kialakításának lehetőségei

Az első lépésben a fotoreziszt-ábrát kell kialakítanunk, majd az LB gömbréteg húzása után lift-off technikával el kell távolítani a gömböket a kiemelkedő ábrák helyén. A továbbiak úgy következnek, mint a periodikus szerkezet kialakítása során, mint az előbb.



Az optikai vizsgálatok terén hullámvezető felszínére húzott LB rétegeket mértünk OWLS-sel. Bár a motiváció rendkívül gyakorlati volt – jövőbeni orvos-biológiai kísérletek szempontjából – az optikai kiértékelés is izgalmas kihívásokat tartogatott, főként az ellipszométeres mérések kiértékelésével összevetve. Ugyanis eredményeink szerint az evanescens mező exponenciális lecsengése miatt a golyókból álló rétegnek nem feleltethető meg egy homogén optikai réteg, effektív törésmutatóval és vastagsággal. Megoldást javasoltunk a réteg “szeletelésére”, de igazi megoldást a törésmutató-gradiens (közel) analitikus kezelése, illetve a véges-elem szimuláció jelentene.

A két téma új eredményeit ősszel az ECIS / ECIC konferencián mutattuk be egy-egy poszteren, nemzetközi folyóiratban még nem kerültek publikálásra.

További kísérleti munkánkat a pórusos szilícium alapú kétdimenziós kristályok előállítására kívánjuk koncentrálni. Mérési eszközeink fejlesztése céljából vásároltunk egy „Nanocube” típusú pozicionáló eszközt a PI - PhysikInstrumente cég gyártmányát.